

Б. П. СЕРЕДА, И. В. ПАЛЕХОВА, Д. Б. СЕРЕДА

УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ПРОКАТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫМИ ТИТАНОВЫМИ ПОКРЫТИЯМИ С ПОМОЩЬЮ ИНОВАЦИОННОЙ СВС-ТЕХНОЛОГИИ

Рассмотрена СВС-технология получения многокомпонентных титановых покрытий в режиме теплового самовоспламенения на сталях массового назначения. Исследованы закономерности и механизмы их формирования. Экспериментально установлена роль активаторов в процессе диффузионного насыщения, а также зависимость толщины покрытий от технологических параметров процесса (температуры и продолжительности изотермической выдержки). Экспериментально установлено, что максимальная концентрация порошка меди в СВС-шихте не должна превышать 7-8%, так как ее рост приводит к резкому увеличению максимальной температуры воспламенения t_m , что приведет к перегреву металла основы и снижению ее физико-механических свойств, а также к спеканию шихты и, следовательно, уменьшению ее газопроницаемости для составляющих газовой фазы. По результатам рентгеноструктурного и металлографического анализов установлено, что полученные покрытия имеют многофазное строение: на поверхности технически чистого железа и углеродистых сталей образуется слой алюминида Fe_2Al_5 , твердых растворов $FeAl$, Fe_3Al , легированных титаном и зона твердого раствора Ti и Al в α -Fe.

Изучено влияние составов реакционных смесей на свойства полученных покрытий. Показаны результаты исследований структуры и свойств комплексных титановых покрытий, полученных в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в различных составах реакционных шихт. Приведен сравнительный анализ эксплуатационных характеристик СВС-покрытий и диффузионных покрытий, полученных методом химико-термической обработки. Испытания показали, что коррозионная стойкость СВС-покрытий в 1,6–1,7 раза выше, чем покрытий, полученных в результате диффузионного насыщения. Это может быть обусловлено микролегированием зерен покрытия (как границ, так и тела зерна) алюминием и хромом при СВС-процессе.

Ключевые слова: химические газотранспортные реакции, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, покрытие, тепловое самовоспламенение, жаростойкость, диффузия.

Б. П. СЕРЕДА, І. В. ПАЛЕХОВА, Д. Б. СЕРЕДА

ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ПРОКАТНОГО ОБЛАДНАННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИМИ ТИТАНОВИМИ ПОКРИТТЯМИ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНОВАЦІЙНОЇ СВС-ТЕХНОЛОГІЇ

Розглянуто СВС-технологія отримання багатоконпонентних титанових покриттів в режимі теплового самозаймання на сталях масового призначення. Досліджено закономірності та механізми їх формування. Експериментально встановлено роль активаторів в процесі дифузійного насичення, а також залежність товщини покриттів від технологічних параметрів процесу (температури і тривалості ізотермічної витримки). Експериментально встановлено, що максимальна концентрація порошку міді в СВС-шихті не повинна перевищувати 7-8%, так як її зростання призводить до різкого збільшення максимальної температури займання t_m , що призведе до перегріву металу основи і зниження її фізико-механічних властивостей, а також до спікання шихти і, отже, зменшення її газопрониємності для складових газів фаз. За результатами рентгеноструктурного і металлографічного аналізів встановлено, що отримані покриття мають багатопазний будова: на поверхні технічно чистого заліза і вуглецевих сталей утворюється шар алюмінідів Fe_2Al_5 , твердих розчинів $FeAl$, Fe_3Al , легованих титаном і зона твердого розчину Ti і Al в α -Fe.

Вивчено вплив складів реакційних сумішей на властивості отриманих покриттів. Показані результати досліджень структури і властивостей комплексних титанових покриттів, отриманих в умовах високотемпературного синтезу в різних складах реакційних шихт. Наведено порівняльний аналіз експлуатаційних характеристик СВС-покриттів і дифузійних покриттів, отриманих методом хіміко-термічної обробки. Випробування показали, що корозійна стійкість СВС-покриттів в 1,6-1,7 рази вище, ніж покриттів, отриманих в результаті дифузійного насичення. Це може бути обумовлено мікролегуванням зерен покриття (як кордонів, так і тіла зерна) алюмінієм і хромом при СВС-процесі.

Ключові слова: хімічні газотранспортні реакції, високотемпературний синтез, покриття, теплове самозаймання, жаро стійкість, дифузія ,

B. P. SEREDA, I. V. PALEKHOVA, D. B. SEREDA

STRENGTHENING OF ROLLING EQUIPMENT ITEMS WITH MULTICOMPONENT TITANIUM COATINGS WITH THE HELP OF INNOVATIVE SHS-TECHNOLOGY

The SHS-technology for producing multicomponent titanium coatings in the thermal self-ignition mode on steels of mass purpose is considered. The laws and mechanisms of their formation are investigated. Experimentally established the role of activators in the process of diffusion saturation, as well as the dependence of the thickness of the coatings on the technological parameters of the process (temperature and duration of isothermal exposure). It was established experimentally that the maximum concentration of copper powder in the SHS mixture should not exceed 7-8%, since its growth leads to a sharp increase in the maximum ignition temperature t_m , which will lead to overheating of the base metal and decrease its physical and mechanical properties, as well as sintering the mixture and, consequently, reducing its gas permeability for the components of the gas phase. According to the results of X-ray structural and metallographic analyzes, it was found that the coatings obtained have a multiphase structure: a layer of aluminide Fe_2Al_5 , solid solutions $FeAl$, Fe_3Al doped with titanium and a solid solution Ti and Al in α -Fe are formed on the surface of technically pure iron and carbon steel.

The effect of the composition of the reaction mixtures on the properties of the coatings obtained was studied. The results of studies of the structure and properties of complex titanium coatings obtained under conditions of self-propagating high-temperature synthesis in various compositions of the reaction mixtures are shown. A comparative analysis of the operational characteristics of SHS coatings and diffusion coatings obtained by the method of chemical heat treatment is given. Tests have shown that the corrosion resistance of SHS coatings is 1.6–1.7 times higher than that obtained as a result of diffusion saturation. This may be due to the micro-alloying of the coating grains (both the boundaries and the grain body) with aluminum and chromium during the SHS process.

Keywords: chemical gas transport reactions, self-propagating high-temperature synthesis, coating, thermal self-ignition, heat resistance, diffusion,

Введение. Для большинства деталей машин, оборудования, инструмента, работающих в сложных эксплуатационных условиях, большое значение имеют

свойства поверхностного слоя. Во многих случаях для поверхностного упрочнения применяют различные методы химико-термической обработки (ХТО).

Одним из эффективных методов ХТО, позволяющим улучшить коррозионную, износостойкость, жаростойкость стальных изделий, является совместное насыщение титаном и алюминием из порошковых сред. При этом содержание основных насыщающих элементов в порошковой смеси достигает 80 %, а продолжительность процесса варьируется от 4 до 12 часов [1–5]. Однако длительная высокотемпературная изотермическая выдержка может привести к перегреву стальных изделий, что значительно ухудшает структуру и механические свойства деталей, недостатками процессов традиционной химико-термической обработки является также их высокая энергоёмкость, что приводит к повышению себестоимости изделий.

В связи с этим, актуально применение технологий, позволяющих получать покрытия при ограниченном или минимальном времени их формирования, а также снизить процентное содержание насыщающих элементов в смесях при сохранении эксплуатационных свойств покрытий.

Одной из таких технологий является метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), совмещенный с химическими газотранспортными реакциями [6–10].

СВС представляет собой высокоинтенсивное экзотермическое взаимодействие химических элементов в конденсированной фазе, способное к самопроизвольному распространению в виде волны горения. Процесс может осуществляться в режиме горения или теплового воспламенения и характеризуется интенсивным нанесением покрытий благодаря наличию градиента температур в системе изделие – порошковая среда.

Эффективность обработки определяется временными параметрами процесса и теплофизическими характеристиками СВС-смесей. Поэтому представляет интерес поиск механизма воздействия на протекание процессов теплового воспламенения.

Целью настоящей работы является разработка оптимальных составов порошковых СВС-смесей для нанесения титаноалитированных покрытий в режиме теплового самовоспламенения, изучение влияния добавок-катализаторов на теплофизические свойства СВС-смесей и протекание процесса диффузионного насыщения в нестационарных температурных условиях. Сравнительный анализ технологических параметров СВС-процесса, структуры, фазового, химического состава и свойств покрытий, полученных в СВС-смесях без добавок металлов-активаторов и с ними, а также оценка качества формирующихся покрытий.

Методика проведения исследования. Для нанесения покрытий использовали образцы из железа технической чистоты и сталей массового назначения (сталь 20, сталь 45, У8).

Химико-термическую обработку осуществляли в реакторе открытого типа ($P=10^5$ Па) в рабочем интервале температур 950–1200°C и продолжительности изотермической выдержки 30÷60 минут. Для приготовления реакционных СВС-смесей использовали порошки оксидов хрома и

алюминия, титана, алюминия, меди технической чистоты, металлического йода дисперсностью 200–350 мкм.

Нанесение покрытий проводили в режиме теплового самовоспламенения СВС-процесса.

Подготовка поверхности образцов включала последовательные стадии шлифовки, полировки и обезжиривания в ацетоне.

Инициирование процесса насыщения осуществляли путем предварительного нагрева в печи сопротивления до температуры начала самовоспламенения (скорость нагрева – 0,5°C/с).

Температуры СВС-смеси контролировали хромель-алюмелевой термопарой в защитном чехле, введенной непосредственно в объем шихты, и подключенной к потенциометру серии КСП.

Толщину упрочненных слоев исследовали на световом микроскопе "Neophot-21" при увеличении $\times 150$. Микроструктуру выявляли методом травления в 3% спиртовом растворе пикриновой кислоты (ТУ 6-09-08-317-80). Для выявления границ зерен феррита использовали 4% спиртовой раствор азотной кислоты [11].

Анализ фазового состава покрытий осуществлялся на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М.

Исследование элементного состава проводили методом микрорентгеноспектрального анализа с применением микроанализатора JEOL "Superprob-733". Локальность анализа 1 мкм², глубина анализа ~ 1 мкм.

Микротвердость покрытий определяли на приборе ПМТ-3. Коррозионную стойкость образцов с покрытиями оценивали в 10-% растворе H₂SO₄ при температуре 20°C.

Для расчета равновесного состава продуктов системы был использован прикладные пакеты программ "АСТРА.4", TERA, Recalc [12].

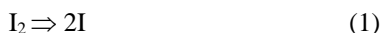
Результаты исследования и их обсуждение. Анализ реакций, происходящих при воспламенении СВС-смеси, а также результатов экспериментов и металлографических исследований позволили определить механизм образования комплексных покрытий на основе титана.

Теплофизически процесс образования покрытий в режиме теплового самовоспламенения разделяют на пять последовательных стадий: инертный прогрев реакционной смеси до температуры воспламенения; тепловое самовоспламенение; прогрев изделий; изотермическая выдержка; охлаждение.

Продолжительность первой стадии в значительной степени зависит от состава смеси и ее тепловых характеристик. Поэтому введение в состав реакционных смесей веществ (катализаторов), обладающих высокими показателями теплопроводности позволяет интенсифицировать процесс самовоспламенения, а именно – снизить температуру начала воспламенения t_* и значительно увеличить скорость прогрева шихты с 0,86 °C/с до 4,16 °C/с по сравнению с СВС-смесями без добавок катализатора (рис. 1)

В данной работе в качестве катализатора был применен порошок меди. Аналогичным образом влияет на основные характеристики процесса теплового самовоспламенения (t_* и t_m) увеличение в шихте концентрации активной экзотермической составляющей $\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Al}$ и газотранспортного агента I_2 .

На стадии инертного прогрева происходит испарение и распад используемых газотранспортных носителей по реакции

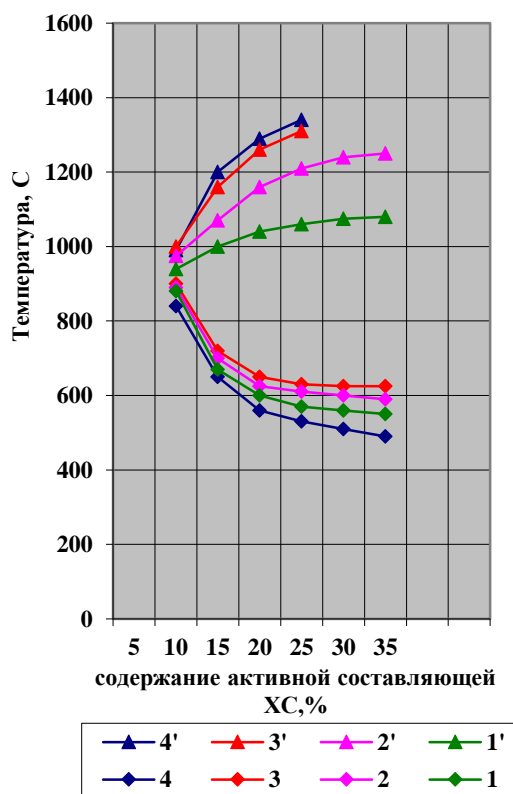


На данной стадии диффузионный слой еще не формируется.

На второй стадии (теплового самовоспламенения) протекает основная экзотермическая реакция восстановления оксида хрома:

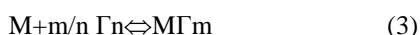


Температура в реакторе резко повышается до максимальной температуры процесса t_m . Происходит образование газообразных соединений и перенос основных насыщающих элементов к подложке:



1-1' – $k=5\%$; 2-2' – $k=10\%$; 3-3' – $k=15\%$; 4-4' – $k=10\%$, $l=8\%$
 $\Delta - T_m$; $\diamond - T_*$

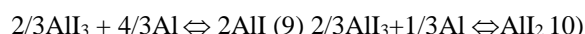
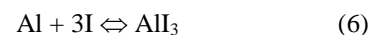
Рис. 1 – Зависимость температур воспламенения T_* и максимальной температуры T_m от содержания в реакционной смеси активной составляющей, алюминия и меди в системе $b(\text{Cr}_2\text{O}_3 + 2\text{Al}) + n \text{Ti} + k \text{Al} + l \text{Cu} + m \text{Al}_2\text{O}_3 + f \text{I}_2$



где M – наносимый элемент, Гn – галоген, МГm – летучий галогенид.

При этом необходимо, чтобы транспортируемый элемент и подложка находились в разных температурных зонах.

Присутствие в газовой фазе как I , так и I_2 свидетельствует о протекании в исследуемом диапазоне температур следующих химических транспортных реакций:



Более вероятны реакции взаимодействия элементов системы с йодом в атомарном состоянии.

Также на стадии теплового самовоспламенения для СВС-составов, содержащих добавки порошка меди, при достижении максимальных температур, возможен жидкостный механизм транспорта насыщающих элементов в диффузионную зону (титан и алюминий растворяются в меди и переносятся к подложке).

Экспериментально установлено, что максимальная концентрация порошка меди в СВС-шихте не должна превышать 7-8%, так как ее рост приводит к резкому увеличению максимальной температуры воспламенения t_m , что приведет к перегреву металла основы и снижению ее физико-механических свойств, а также к спеканию шихты и, следовательно, уменьшению ее газопроницаемости для составляющих газовой фазы.

На поверхности внесенных в порошковую систему стальных изделий на этой стадии возможно протекание гетерогенных реакций обмена с железом подложки.

На третьей стадии (прогрева изделий) происходит выравнивание температуры по объему реактора. Температура процесса снижается до расчетной температуры насыщения. Начинается формирование покрытия.

На стадии изотермической выдержки происходит диффузионный рост покрытия. Протекают процессы, аналогичные диффузионному насыщению в стационарных условиях.

На стадии охлаждения формирование диффузионных слоев происходит менее интенсивно, что объясняется уменьшением коэффициентов диффузии насыщающих элементов.

Размер зерен покрытия зависит от скорости охлаждения. Исследования показывают, что

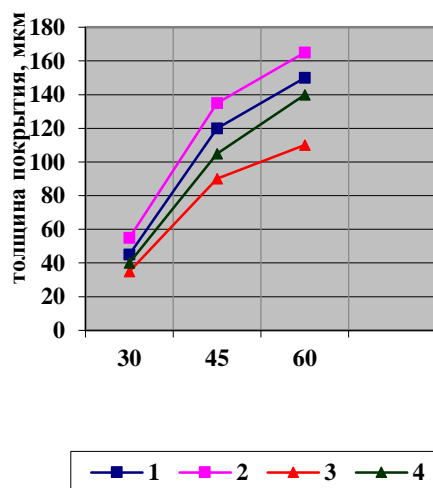
максимальная скорость роста покрытий наблюдается на начальных этапах СВС-процесса. Это может объясняться тем, что аустенит, образующийся при резком повышении температуры на стадии теплового самовоспламенения характеризуется высокой плотностью дислокаций. В связи с чем его диффузионная восприимчивость увеличивается.

Регулируя температурные условия процесса, можно управлять как скоростью роста слоев, так и их структурой.

На толщину формирующихся покрытий влияют состав шихты, продолжительность и температура изотермической выдержки, а также химический состав подложки.

На рисунках 2, 3 представлены зависимости толщин комплексных титановых покрытий, полученных на технически чистом железе и углеродистых сталях 20, 45, У8 в системах Ti-Al и Ti-Al-Cu от температуры насыщения (t_n) и продолжительности изотермической выдержки (τ).

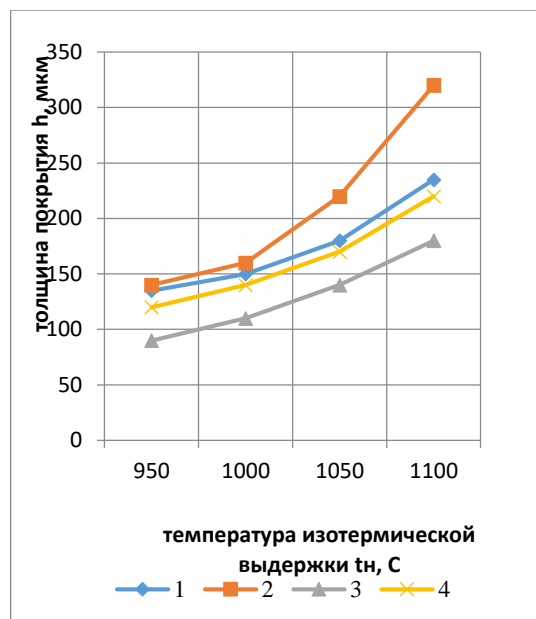
Увеличение этих параметров приводит к росту толщины диффузионного слоя. С увеличением концентрации углерода в подложке, толщина покрытия уменьшается.



1,3 – насыщение в составе b (Cr_2O_3+2Al)+ n Ti+ k Al+ m Al_2O_3+f I_2

2,4 – насыщение в составе b (Cr_2O_3+2Al)+ n Ti+ k Al+ l Cu+ m Al_2O_3+f I_2

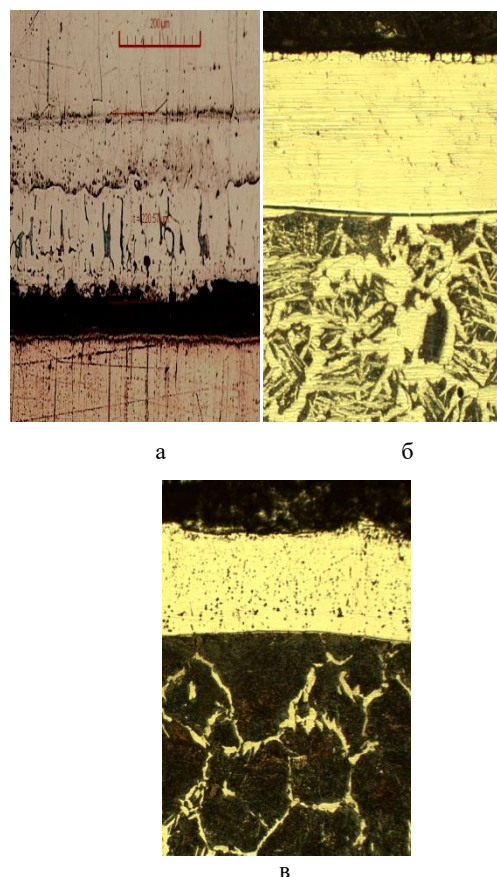
Рис. 2 – Влияние продолжительности изотермической выдержки на толщину титаноалитированных слоев, полученных на технически чистом железе (графики 1,2) и стали 20 (графики 3,4) в режиме теплового самовоспламенения при температуре насыщения $t_n=1000$ °C.



1,3 – насыщение в составе b (Cr_2O_3+2Al)+ n Ti+ k Al+ m Al_2O_3+f I_2

2,4 – насыщение в составе b (Cr_2O_3+2Al)+ n Ti+ k Al+ l Cu+ m Al_2O_3+f I_2

Рис. 3 – Влияние температуры изотермической выдержки на толщину титаноалитированных слоев, полученных на технически чистом железе (графики 1,2) и стали 20 (графики 3, 4) в режиме теплового самовоспламенения. Продолжительность изотермической выдержки $\tau_n=60$ мин



а – технически чистое железо ($\times 145$);
б – сталь 45 ($\times 125$);
в – У8 ($\times 100$).

Рис. 4 – Микроструктуры титаноалитированных покрытий

По результатам рентгеноструктурного и металлографического анализов установлено, что полученные покрытия имеют многофазное строение: на поверхности технически чистого железа и углеродистых сталей образуется слой алюминидов Fe_2Al_5 , твердых растворов FeAl , Fe_3Al , легированных титаном и зона твердого раствора Ti и Al в α -Fe. При насыщении в СВС-смесь, содержащих дополнительно порошок меди, также возможно образование алюминидов меди Cu_3Al_4 (рис. 4).

Такой фазовый состав объясняется тем, что алюминий и медь при температуре химико-термической обработки находятся в жидком состоянии и диффундируют в подложку активнее, чем титан.

При диффузии некарбидообразующего элемента в γ -железе после достижения предела растворимости происходит превращение $\gamma \rightarrow \alpha$. В α -железе растворимость углерода незначительна, что вызывает его отеснение вглубь подложки. Это приводит к формированию зоны с повышенным содержанием углерода под покрытием на образцах углеродистых сталей [13].

От содержания основных насыщающих элементов в шихте зависит как общая толщина покрытия, так и толщина зон отдельных фаз. С увеличением концентрации титана и алюминия общая толщина покрытия растёт.

Диаграммы распределения микротвердостей по толщине покрытий, полученных при насыщении в составах Cr_2O_3 -Ti-Al- Al_2O_3 -I₂ и Cr_2O_3 -Ti-Al-Cu- Al_2O_3 -I₂ на образцах из железа технической чистоты (рис. 5) показало увеличение микротвердости поверхностного слоя до 3200 и 4000 МПа по сравнению с микротвердостью основы 1100–1200 МПа.

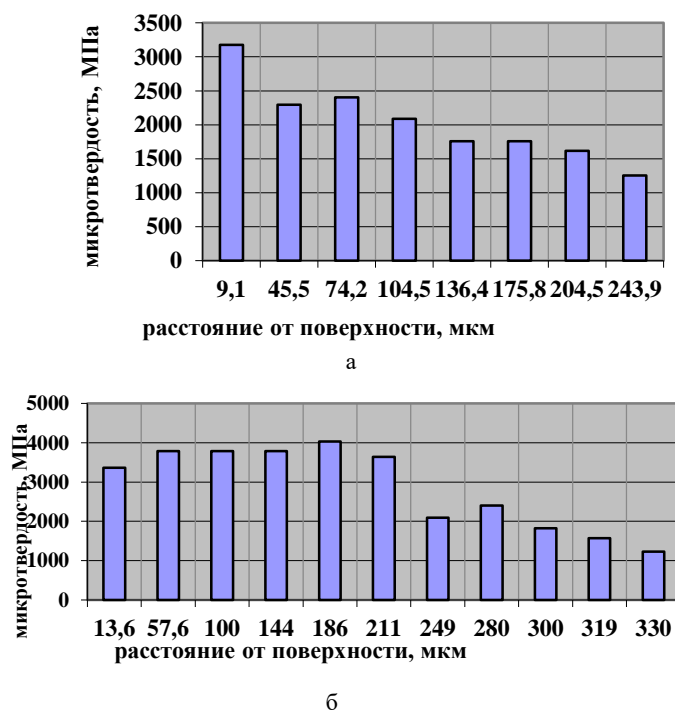


Рис. 5 – Диаграммы распределения микротвердости по толщине покрытий, полученных в различных составах, на образцах из технически чистого железа:

а – состав реакционной смеси $b(\text{Cr}_2\text{O}_3+2\text{Al})+n \text{Ti}+k \text{Al}+m \text{Al}_2\text{O}_3+f \text{I}_2$
 б – состав реакционной смеси $b(\text{Cr}_2\text{O}_3+2\text{Al})+n \text{Ti}+k \text{Al}+l \text{Cu}+m \text{Al}_2\text{O}_3+f \text{I}_2$

Для оценки эффективности газотранспортных СВС-технологий для нанесения многокомпонентных титановых покрытий на железоуглеродистых сплавах, представляет интерес сравнительный анализ защитных свойств СВС-покрытий, полученных в различных составах насыщающих смесей и аналогичных покрытий, полученных методом традиционной химико-термической обработки.

В работе исследовалась коррозионная стойкость титано-алитированных СВС-покрытий, наносимых при изотермической выдержке 60 минут и диффузионных аналогов (такой же толщины), формирующихся при продолжительности обработки 4 часа.

Испытания показали, что коррозионная стойкость СВС-покрытий в 1,6–1,7 раза выше, чем покрытий, полученных в результате диффузионного насыщения. Это может быть обусловлено микролегированием зерен покрытия (как границ, так и тела зерна) алюминием и хромом при СВС-процессе.

Выводы:

1. Газотранспортная СВС-технология является эффективным способом нанесения комплексных покрытий на основе титана, обеспечивает высокую стабильность результатов обработки при ограниченной продолжительности процесса.

2. Для интенсификации процессов диффузионного насыщения и снижения энергозатрат на стадии инертного прогрева, может быть рекомендовано введение в состав реакционных смесей металлов-катализаторов.

3. Титаноалитированные стали с СВС-покрытиями по сравнению с диффузионными аналогами обладают улучшенными эксплуатационными свойствами при снижении продолжительности обработки в 4 раза.

Список литературы

1. Земсков Г.В., Коган Р.Л., Милохина Л.В., Степаненко Л.Б., Шестаков А.И., Косс Е.В. Диффузионные карбидные покрытия на стали//Защитные покрытия на металлах. Вып.6., 1972.
2. Ворошнин Л.Г. Антикоррозионные диффузионные покрытия – Минск: Наука и техника, 1981 – 296 с.
3. Полевой С.Н., Евдокимов В.Д. Упрочнение машиностроительных материалов: справочник-2 изд., перераб. и доп. – М: Машиностроение, 1994 – 496 с.
4. Многокомпонентные диффузионные покрытия / Ляхович Л.С., Ворошнин Л.Г., Панич Г.Г., Щербаков Э.Д. – Минск: Наука и техника, 1974 – 236 с.
5. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справочник / под ред. Ляховича Л.С. – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
6. Мержанов А.Г. Процессы горения и синтез материалов. – Черноголовка: ИСМАН, 1998. – 512 с.
7. Grigor'ev Y.M., Merzhanov A.G. SHS coatings / Int. J. of SHS, 1992, v.1, №4. – p. 600-639
8. Коган Я.Д., Серeda Б.П., Штессель Э.А. Высокоинтенсивный способ получения покрытий в условиях СВС / Металловедение и термическая обработка металлов, 1991, №6. – с.39-40
9. Серeda Б.П. Получение защитных покрытий в условиях СВС // Новые материалы и технологии. – Бельфор: НИИФ, 1991. – 278 с.
10. Шефер Г. Химические транспортные реакции. – М.: Мир, 1964. – 189 с
11. Беккерт М., Клемм Х. Справочник по металлографическому травлению. – М.: Металлургия, 1979. – 336 с.
12. Синярев Г.Б., Ватолин Н.А., Трусов Б.Г., Моисеев Р.К. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов. – М.: Наука, 1982. – 263с.
13. Шатинский В.Ф., Нестеренко А.И. Защитные диффузионные покрытия. – Киев: Наук. думка, 1988. – 272 с.

References (transliterated)

1. Zemskov G.V., Kogan R.L., Miljuhina L.V., Stepanenko L.B., Shestakov A.I., Koss E.V. Diffuzionnye karbidnye pokrytija na stali/Zashhitnye pokrytija na metallah. Vyp.6, 1972 (in Russian).
2. Voroshnin L.G. Antikorroziionnye diffuzionnye pokrytija – Minsk: Nauka i tehnika, 1981 – 296 p. (in Russian).
3. Polevoj S.N., Evdokimov V.D. Uprochnenie mashinostroitel'nyh materialov: Spravochnik – 2 izd., pererab. i dop. – Moscow: Mashinostroenie, 1994 – 496 p. (in Russian).
4. Mnogokomponentnye diffuzionnye pokrytija / Ljahovich L.S., Voroshnin L.G., Panich G.G., Shherbakov Je.D. – Minsk: Nauka i tehnika, 1974 – 236 p. (in Russian).
5. Himiko-termicheskaja obrabotka metallov i splavov: Spravochnik / pod red. Ljahovicha L.S. – Moscow: Metallurgija, 1981. – 424 p. (in Russian).
6. Merzhanov A.G. Processy gorenija i sintez materialov. – Chernogolovka: ISMAN, 1998. – 512 p. (in Russian).
7. Grigor'ev Y.M., Merzhanov A.G. SHS coatings / Int. J. of SHS, 1992, v.1, No4. – p. 600–639 (references)
8. Kogan Ja.D., Sereda B.P., Shtessel' Je.A. Vysokointensivnyj sposob poluchenija pokrytij v uslovijah SVS / Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov, 1991, No6. – p. 39–40 (in Russian).
9. Sereda B.P. Poluchenie zashhitnyh pokrytij v uslovijah SVS // Novye materialy i tehnologii. – Bel'fort: NIIF, 1991. – 278 p. (references)
10. Shefer G. Himicheskie transportnye reakcii. – Moscow: Mir, 1964. – 189 p. (in Russian).
11. Bekkert M., Klemm H. Spravochnik po metallograficheskomu travleniju. – Moscow: Metallurgija, 1979. – 336 p. (in Russian).
12. Sinjarev G.B., Vatolin N.A., Trusov B.G., Moiseev R.K. Primenenie JeVM dlja termodinamicheskikh raschetov metallurgicheskikh processov – Moscow: Nauka, 1982. – 263 p. (in Russian).
13. Shatinskij V.F., Nesterenko A.I. Zashhitnye diffuzionnye pokrytija. – Kiev: Nauk. dumka, 1988. – 272 p. (in Russian).

Поступила (received) 22.10.2018

Відомості про авторів /Сведения об авторах / About the Authors

Середа Борис Петрович (Середа Борис Петрович, Sereda Borys Petrovich) – научный руководитель научно-исследовательского центра «Материаловедения и инновационных технологий», доктор технических наук, профессор Днепропетровского государственного технического университета, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9518-381X>; e-mail: seredabp@ukr.net

Палехова Ирина Владимировна (Палехова Ирина Володимирівна, Palekhova Irina Vladimirovna) – аспірант кафедри «Автомобілі та автомобільне господарство» Дніпровський державний технічний університет, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6507380761>, e-mail: seredabp@ukr.net

Середа Дмитрий Борисович (Середа Дмитро Борисович, Sereda Dmytro Borisovich) – ассистент кафедры «Машиностроение» Днепропетровского государственного технического университета, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4353-1365>; e-mail: seredabp@ukr.net